VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

3. Răspunsul seismic al sistemelor SGLD

3.1. Mişcarea seismică

Reprezentarea cea mai uzuală a mişcării seismice în aplicaţiile inginereşti foloseşte variaţia în timp a acceleraţiei terenului $\ddot{u}_g(t)$ şi se numeşte accelerogramă. Dacă se cunosc proprietăţile unui sistem SGLD (masa *m*, rigiditatea *k* şi coeficientul de amortizare *c*), precum şi cele ale mişcării seismice (înregistrarea acceleraţiei terenului $\ddot{u}_g(t)$), se poate determina deplasarea relativă $u(t)$, viteza relativă $\dot{u}(t)$ şi acceleraţia relativă $\ddot{u}(t)$ a sistemului SGLD, rezolvând ecuaţia de mişcare:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \tag{3.1}$$

Înregistrarea mişcării seismice se face cu ajutorul accelerometrelor, fiecare înregistrare conţinând trei componente (două orizontale şi una verticală). În cele mai multe cazuri mişcarea seismică înregistrată cu ajutorul accelerometrelor se presupune a fi independentă de răspunsul structurii. Această presupunere este valabilă numai pentru terenuri rigide. În cazul unor terenuri flexibile, mişcarea seismică poate fi afectată de interacţiunea teren-structură. Din acelaşi motiv (eliminarea influenţei structurii asupra mişcării seismice), accelerometrele folosite pentru înregistrarea şi caracterizarea mişcării seismice trebuie să fie amplasate în câmp liber, la o distanţă rezonabilă de construcţii existente.

În Figura 3.1 sunt prezentate câteva accelerograme ale unor evenimente seismice, la aceiaşi scară a timpului şi acceleraţiei. Se pot observa diferenţe semnificative ale amplitudinii, duratei, şi ale aspectului general a accelerogramelor.

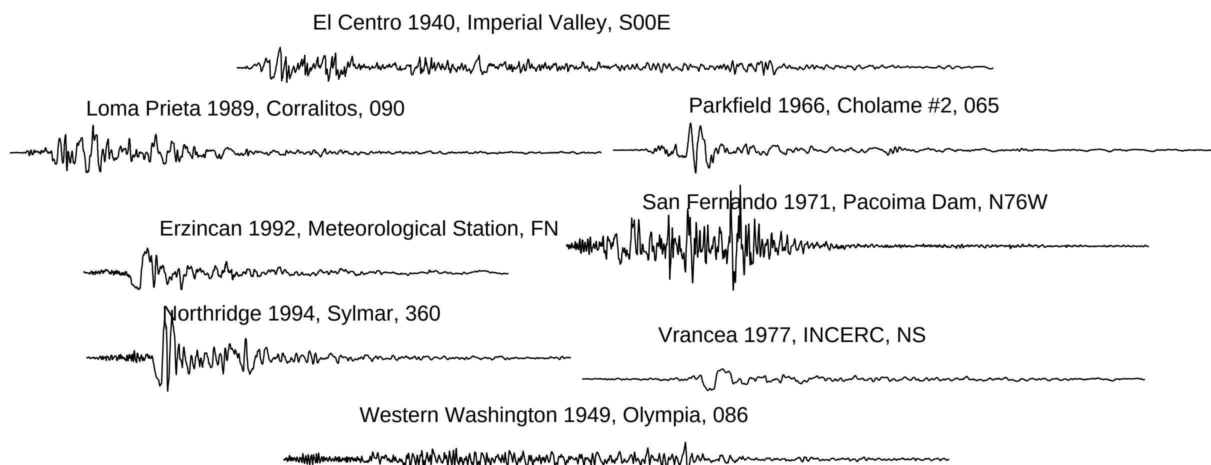


Figura 3.1. Accelerogramele câtorva cutremure, după Chopra, 2001.

Accelerogramele sunt definite de valori numerice înregistrate a intervale de timp discrete. În cele mai multe cazuri acest interval este de 0.02 sau 0.01 secunde.

În Figura 3.2 este prezentată accelerograma componentei nord-sud a înregistrării seismice de la El Centro, California, obţinută în timpul cutremurului Imperial Valley din 18 mai 1940. Variaţia în timp a vitezei şi deplasării terenului au fost obţinute prin integrarea acceleraţiei.

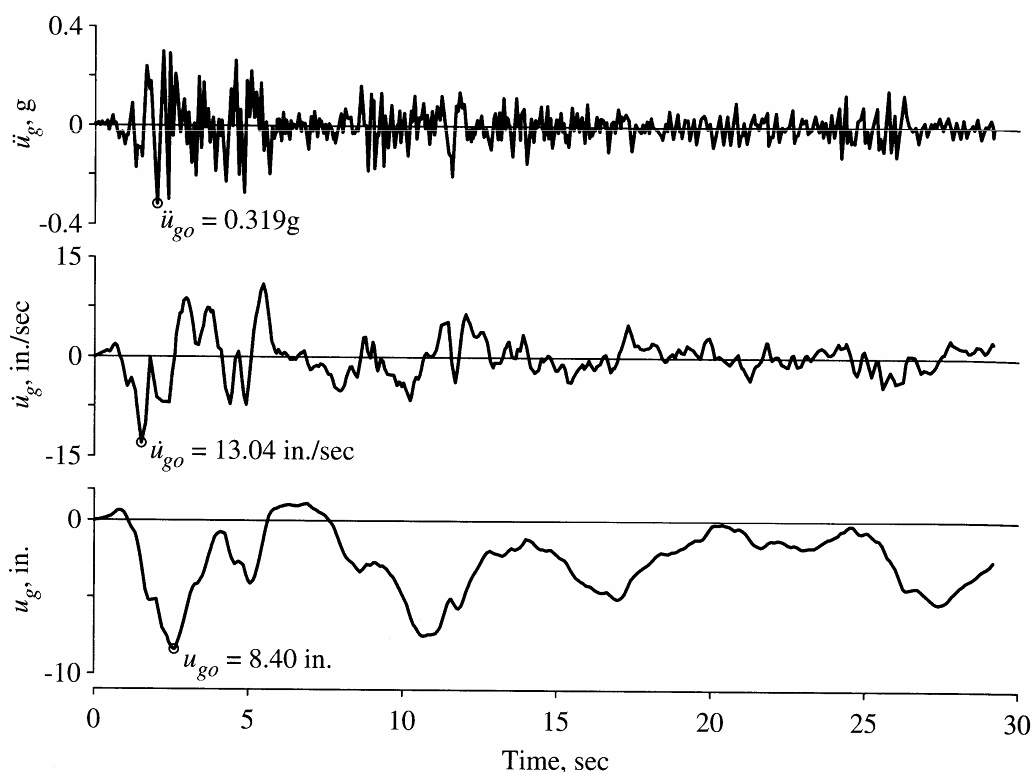


Figura 3.2. Componenta nord-sud a înregistrării seismice de la El Centro, California, obţinută în timpul cutremurului Imperial Valley din 18 mai 1940 (Chopra, 2001).

3.2. Determinarea răspunsului seismic

Împărţind ecuaţia (3.1) cu *m* se obţine:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g \tag{3.2}$$

De aici reiese că deplasarea unui sistem SGLD sub acţiunea mişcării seismice depinde doar de pulsaţia proprie e vibraţie ω_n (sau de perioada proprie de vibraţie T_n) şi de fracţiunea din amortizarea critică ζ, şi se poate scrie $u \equiv u(t, T_n, \zeta)$. Astfel, orice două sisteme SGLD cu aceleaşi valori T_n şi ζ vor avea acelaşi răspuns în deplasare, chiar dacă acestea au mase şi rigidităţi diferite.

Deoarece înregistrările seismice sunt definite la intervale de timp discrete şi sunt foarte neregulate, acestea nu pot fi exprimate analitic. De aceea, rezolvarea ecuaţiei de mişcare se face prin metode numerice (metoda diferenţelor centrale, metoda Newmark, etc.)

În Figura 3.3a este prezentat răspunsul în deplasare a trei sisteme SGLD având aceiaşi amortizare dar perioade proprii de vibraţie diferite, sub acţiunea mişcării El Centro. Se poate observa că timpul necesar efectuării unei oscilaţii complete este apropiat de perioada proprie de vibraţie T_n. Acest fenomen este adevărat doar în cazul mişcărilor seismice cu o bandă largă de frecvenţe. Din aceiaşi figură se poate observa creşterea deplasării de vârf odată cu creşterea perioadei proprii de vibraţie.

În Figura 3.3b este prezentat răspunsul în deplasare a trei sisteme SGLD având aceiaşi perioadă proprii de vibraţie, dar amortizări diferite, sub acţiunea aceleiaşi înregistrări seismice. Deoarece cele trei sisteme au aceiaşi perioadă proprie de vibraţie, alura deformaţiilor este similară de la un sistem la altul, valorile de vârf înregistrându-se la aproximativ acelaşi perioade de timp. Pe de altă parte, valorile mai mari ale amortizării conduc la reducerea deformaţiilor.

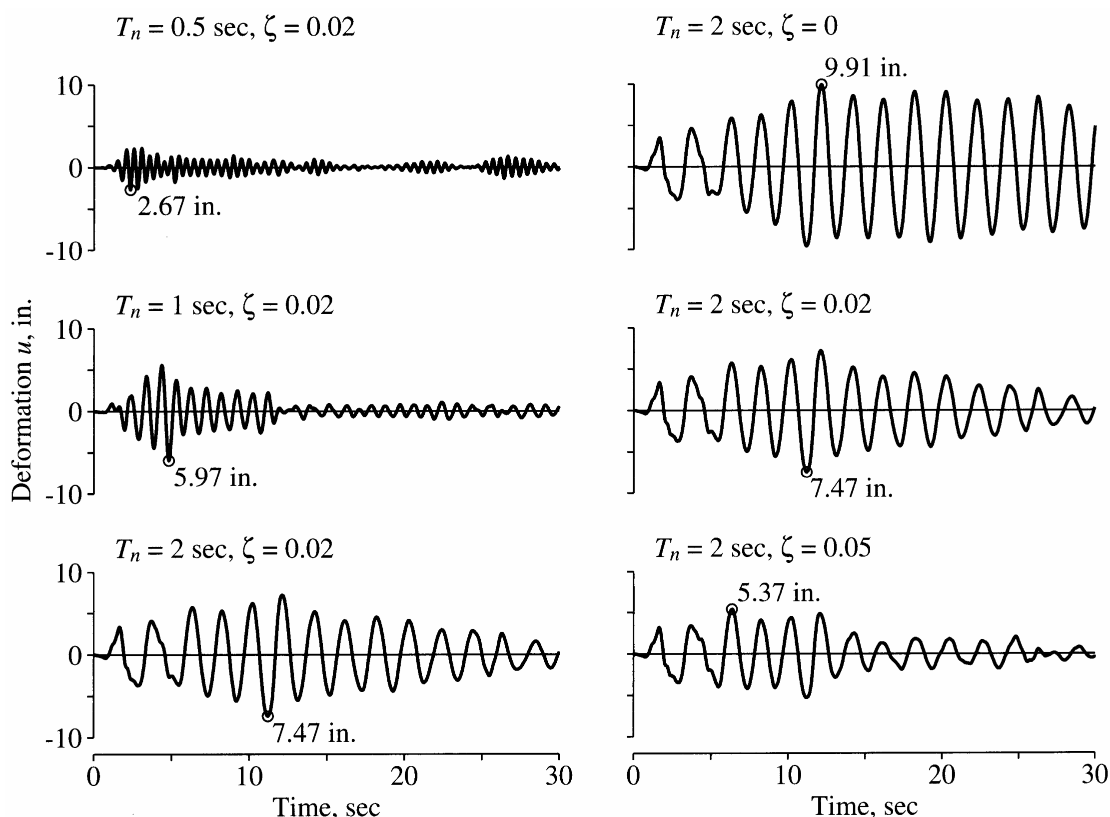


Figura 3.3. Răspunsul în deplasare a unor sisteme SGLD sub acţiunea mişcării El Centro.

3.3. *Spectre elastice de răspuns*

Noţiunea de spectru de răspuns a fost introdusă în 1932 de către M. A. Biot, aceasta fiind în zile noastre un concept central în ingineria seismică. Spectrele de răspuns reprezintă o metodă convenabilă de sintetizare a răspunsului seismic al unor sisteme SGLD sub acţiunea unei înregistrări seismice date.

Un **spectru de răspuns** este reprezentarea valorii de vârf a răspunsului seismic (în termeni de deplasare, viteză, acceleraţie, etc.) al unui sistem SGLD funcţie de perioada proprie de vibraţie T_n (fie pulsaţia sau frecvenţa de vibraţie proprie), pentru o valoare fixă a fracţiunii de amortizare critică ζ. În domeniul construcţiilor spectrele sunt construite în general folosind perioada proprie de vibraţie ca şi abscisă, aceasta având o semnificaţie intuitivă.

Spectrele elastice de răspuns se bazează sisteme SGLD elastice. Matematic, spectrele de răspuns elastice al deplasării, vitezei relative şi acceleraţiei totale se pot exprima, respectiv, prin:

$$u_0\left(T_n,\zeta\right)=\max_t\left|u\left(t,T_n,\zeta\right)\right| \tag{3.3}$$

$$\dot{u}_0\left(T_n,\zeta\right)=\max_t\left|\dot{u}\left(t,T_n,\zeta\right)\right| \tag{3.4}$$

$$\ddot{u}_0^t\left(T_n,\zeta\right)=\max_t\left|\ddot{u}^t\left(t,T_n,\zeta\right)\right| \tag{3.5}$$

3.3.1. Spectru elastic de răspuns al deplasării

În Figura 3.4 este ilustrat modul de construire a unui spectru de răspuns al deplasării pentru înregistrarea seismică El Centro (Figura 3.4a). Deplasarea unor sisteme SGLD elastice sub acţiunea acestei mişcări seismice este prezentată în Figura 3.4b. Pentru fiecare sistem, se determină răspunsul de vârf al deplasării $D \equiv u_o$, care este reprezentat funcţie de perioada proprie de vibraţie corespunzătoare în Figura 3.4c pentru a obţine spectrul de răspuns al deplasării.

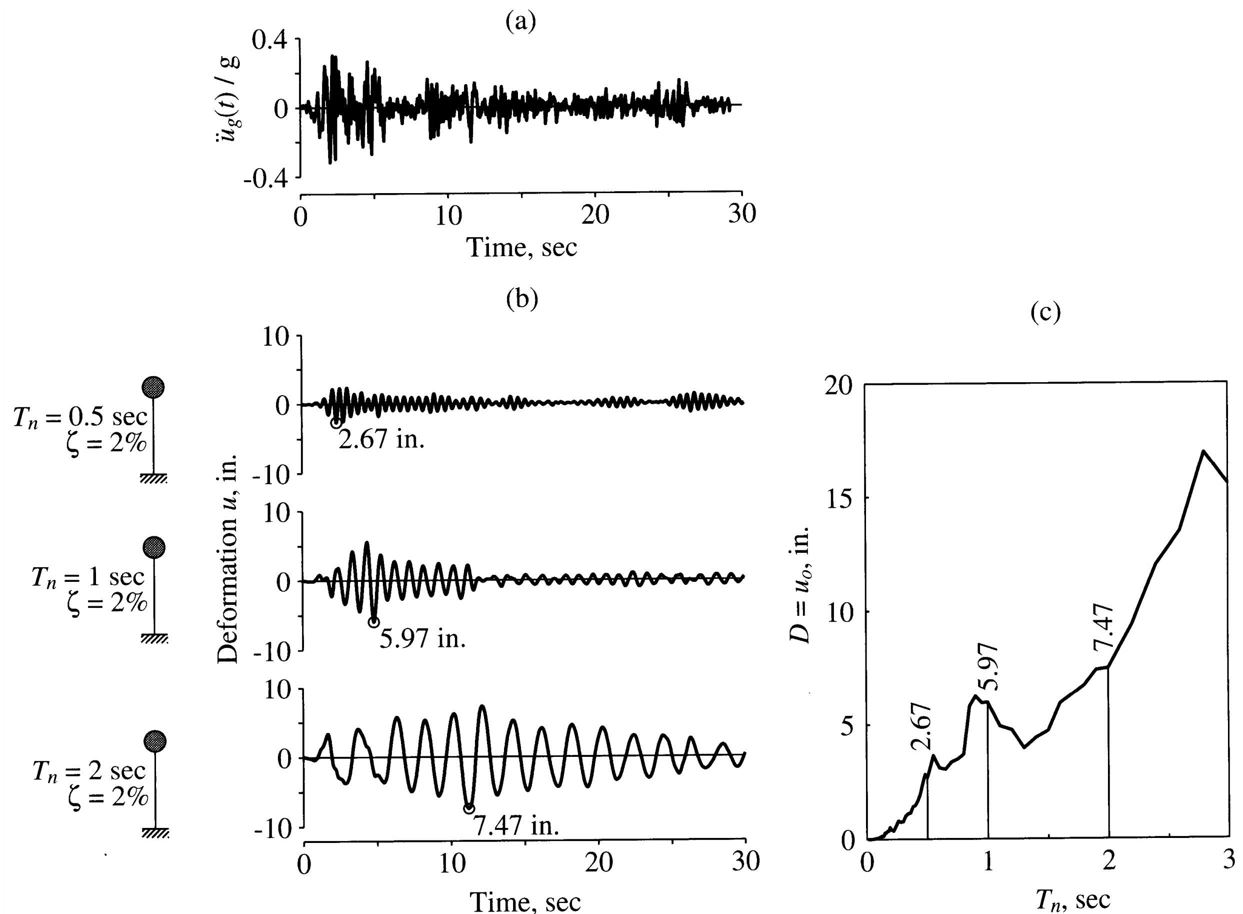


Figura 3.4. Ilustrarea construirii unui spectru de răspuns al deplasării: înregistrarea seismică (a), deplasarea unor sisteme SGLD cu T_n diferite (b) şi spectru de răspuns pentru deplasare (c), Chopra, 2001.

Spectrul de deplasare este foarte important, deoarece pe baza deformațiilor unui sistem SGLD se pot determina eforturile induse în structură (vezi capitolul 2.1.6).

3.3.2. Spectru elastic de răspuns al pseudo-vitezei

Pseudo-viteza relativă spectrală, sau, mai simplu, **pseudo-viteza spectrală** este notată cu *V* şi este dată de expresia:

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \tag{3.6}$$

unde T_n reprezintă perioada proprie de vibrație a unui sistem SGLD, iar *D* este deplasarea spectrală a acestuia.

Pseudo-viteza *V* are unități de viteză, dar are prefixul "pseudo" pentru că nu este egală cu viteza relativă maximă $\dot{u}_0$ a sistemului SGLD. Pseudo-viteza *V* este în relație directă cu energia de deformație de vârf E_{S0}, prin relația:

$$E_{S0} = \frac{mV^2}{2} \tag{3.7}$$

Această relație se poate obține pe baza definiției energiei de deformație şi a relației (3.6):

$$E_{S0} = \frac{ku_0^2}{2} = \frac{kD^2}{2} = \frac{k\left(V/\omega_n\right)^2}{2} = \frac{mV^2}{2}$$

Spectrul de pseudo-viteză se poate obține direct din spectrul de deplasare folosind relația (3.6). În Figura 3.5b este prezentat spectrul de pseudo-viteză pentru înregistrarea El Centro.

3.3.3. Spectru elastic de răspuns al pseudo-accelerației

Cunoscând deformația de vârf a unui sistem SGLD, eforturile de vârf pot fi determinate pe baza conceptului de forță statică echivalentă, discutate în capitolul 2.1.6:

$$f_{S0} = ku_0 \tag{3.8}$$

unde *k* este rigiditatea sistemului SGLD. Înlocuind *k* cu expresia $m\omega_n^2$ obținem:

$$f_{S0} = m\omega_n^2 u_0 = mA \tag{3.9}$$

unde

$$A = \omega_n^2 u_0 = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \tag{3.10}$$

Mărimea *A* se numeşte **pseudo-accelerația spectrală**, are unități de accelerație, dar este diferită de accelerația de vârf $\ddot{u}_0^t$ a sistemului SGLD. Spectrul de pseudo-accelerație se poate obține direct din spectrul de deplasare folosind relația (3.10). În Figura 3.5c este prezentat spectrul de pseudo-accelerație pentru înregistrarea El Centro.

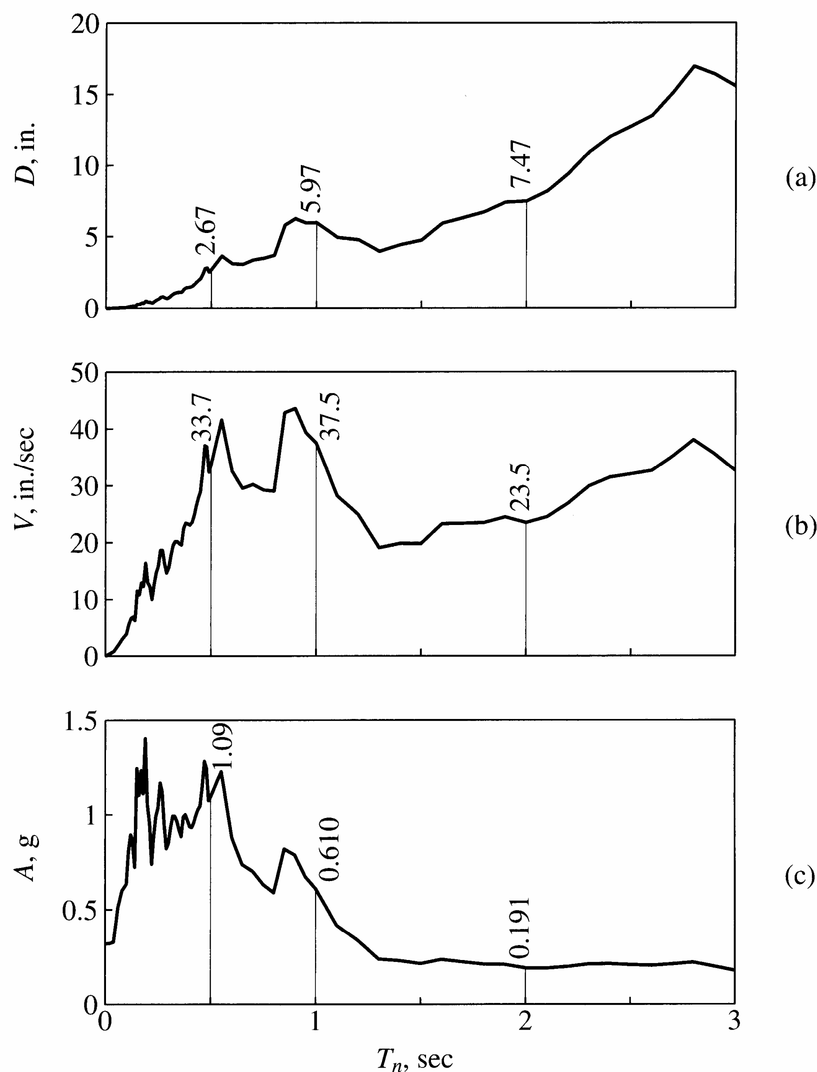


Figura 3.5. Spectre de răspuns pentru înregistrarea El Centro: spectrul de deplasare (a), spectrul de pseudo-viteză (b) şi spectrul de pseudo-accelerație (c), Chopra, 2001.

3.3.4. Spectrul combinat D-V-A

Spectrele de deplasare, de pseudo-viteză şi de pseudo-acceleraţie conţin aceiaşi informaţie, reprezentând trei modalităţi diferite de prezentare a aceleiaşi informaţii. Cunoscând unul din aceste spectre, celelalte două se pot determina direct pe baza ecuaţiilor (3.6) şi (3.10).

Cele trei spectre sunt utile însă pentru că fiecare are o semnificaţie fizică distinctă. Astfel, spectrul de deplasare indică deformaţia de vârf a sistemului SGLD, spectrul de pseudo-viteză este în relaţie cu energia de deformaţie de vârf a sistemului SGLD, iar pe baza spectrului de pseudo-acceleraţie se poate obţine forţa statică echivalentă care acţionează asupra unui sistem SGLD suspus acţiunii seismice.

Ecuaţiile (3.6) şi (3.10) pot fi scrise sub următoarea formă:

$$\frac{A}{\omega_n} = V = \omega_n D \quad sau \quad \frac{T_n}{2\pi} A = V = \frac{2\pi}{T_n} D \tag{3.11}$$

Luând logaritmul zecimal al relaţiei $(T_n/2\pi)A = V$, aceasta poate fi scrisă sub forma $\lg T_n + \lg A - \lg 2\pi = \lg V$. Reprezentată la scară logaritmică (cu $\lg T_n$ pe abscisă şi $\lg V$ pe ordonată), ecuaţia precedentă reprezintă o dreaptă înclinată la +45° pentru o valoarea constantă $\lg A - \lg 2\pi$. În mod similar, ecuaţia $V = (T_n/2\pi)D$ reprezentată pe o scară logaritmică reprezintă o dreaptă înclinată la -45° pentru o valoarea constantă $\lg D + \lg 2\pi$.

În Figura 3.6 este prezentat spectrul de răspuns D-V-A combinat pentru înregistrarea El Centro şi o fracţiune din amortizarea critică ζ=2%. Această reprezentare mai este cunoscută sub denumirea de grafic tripartit şi a fost dezvoltată în 1960 de către Veletsos şi Newmark.

Dintr-un spectru de răspuns combinat D-V-A se pot determina pentru orice perioadă proprie de vibraţie T_n a unui sistem SGLD: pseudo-viteza spectrală V (de pe scala verticală), deplasarea de vârf D (de pe scala înclinată la +45°) şi pseudo-acceleraţia spectrală A (scala înclinată la -45°). Spectrele de răspuns pot fi calculate şi reprezentate pentru câteva valori ale fracţiunii din amortizarea critică, pentru a acoperi o gamă largă de structuri inginereşti.

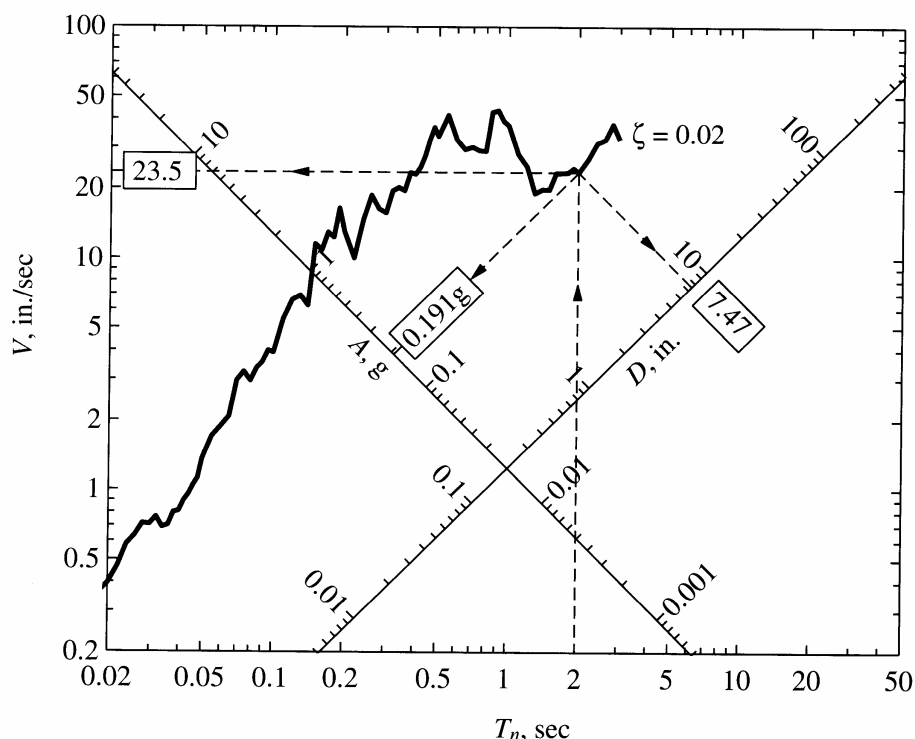


Figura 3.6. Spectrul de răspuns D-V-A combinat pentru înregistrarea El Centro, ζ=2% (Chopra, 2001).

3.3.5. Spectre de viteză şi acceleraţie

Spectrele elastice de răspuns al vitezei şi acceleraţiei se pot obţine conform relaţiilor (3.4) şi (3.5). Există însă puţine motive pentru studierea acestor spectre, deoarece deplasările şi eforturile maxime din structură se pot determina fără aceste spectre.

În general spectrele de viteză şi de pseudo-viteză sunt apropiate ca formă şi alură, valorile celor două spectre fiind foarte apropiate pentru amortizări mici în domeniul de perioade medii.

Spectrele de acceleraţie şi de pseudo-acceleraţie sunt identice în lisa amortizării (ζ=0), dar diferă pentru valori ale amortizării diferite de zero. Diferenţa dintre cele două spectre creşte cu amortizarea şi este maximă în domeniul perioadelor lungi. Pseudo-acceleraţia este întotdeauna mai mică decât acceleraţia spectrală. Acest fapt se poate demonstra pe baza observaţiei că produsul mA reprezintă forţa elastică maximă dezvoltată în sistem sub efectul acţiunii seismice. Spre deosebire de aceasta $m\ddot{u}_0^t$ reprezintă suma forţei elastice şi a celei de amortizare.

3.4. Caracteristicile spectrelor elastice de răspuns

În Figura 3.7 sunt prezentate spectre de răspuns pentru înregistrarea El Centro, normalizate la valorile de vârf ale deplasării terenului u_{g0}, vitezei terenului $\dot{u}_{g0}$ şi acceleraţiei terenului $\ddot{u}_{g0}$. În Figura 3.8 este prezentat spectrul de răspuns normalizat pentru o fracţiune din amortizarea critică ζ=5%, împreună cu o idealizare a acestuia (reprezentată cu linie întreruptă). Vom discuta proprietăţile spectrului de răspuns pentru diferite domenii ale perioadei proprii de vibraţie, separate de valorile T_a=0.035 sec, T_b=0.125 sec, T_c=0.5 sec, T_d=3.0 sec, T_e=10 sec, T_f=15 sec.

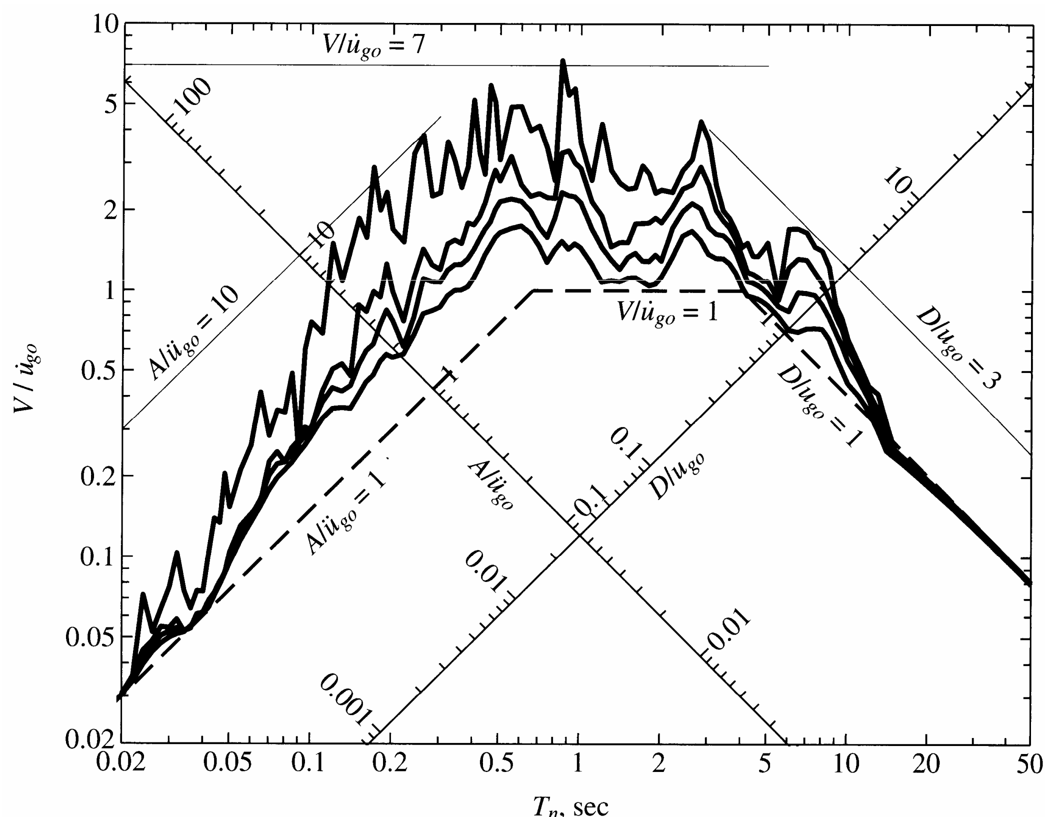


Figura 3.7. Spectre de răspuns normalizate pentru înregistrarea El Centro, pentru trei valori ale fracţiunii din amortizarea critică: ζ=0, 2, 5 şi 10% (Chopra, 2001).

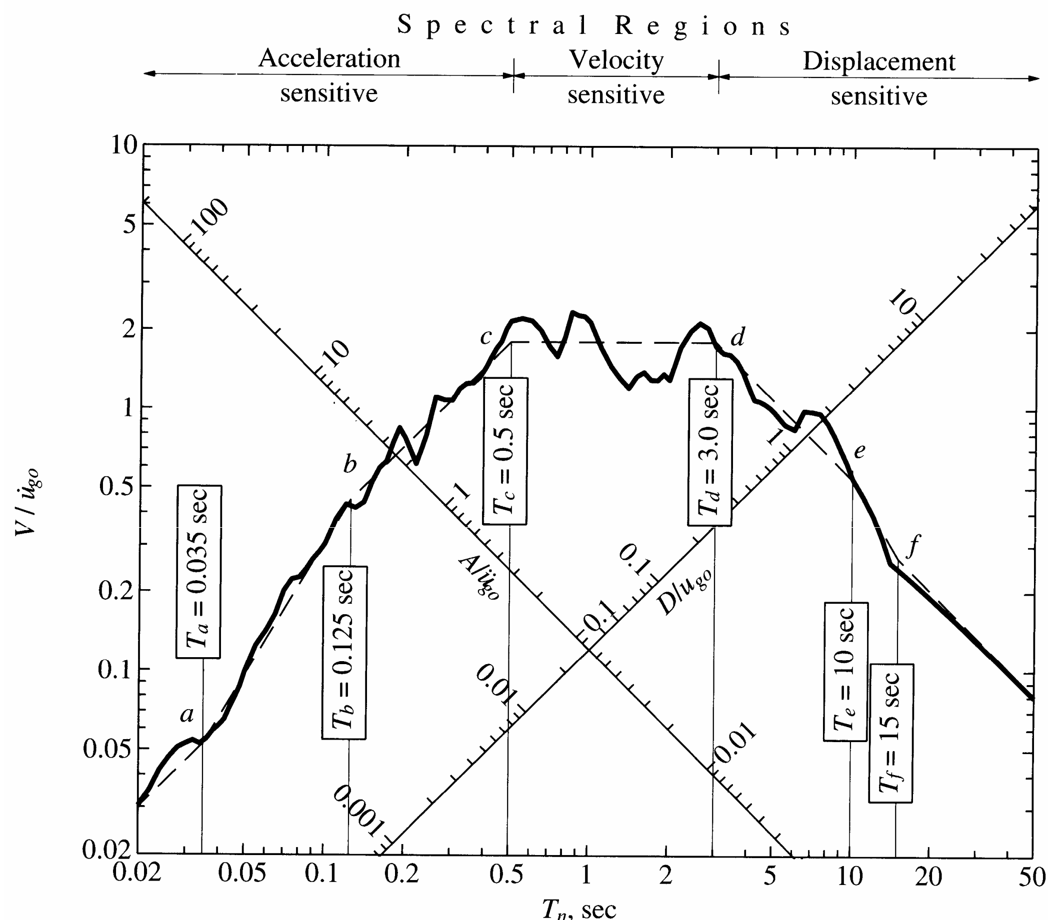


Figura 3.8. Spectru de răspuns normalizat pentru înregistrarea El Centro ζ=5% (linie continuă) şi reprezentarea idealizată (linie întreruptă), Chopra, 2001.

Pentru structuri cu perioada proprie de vibraţie mică (T_n<T_a), valoarea de vârf a pseudo-acceleraţiei A este apropiată de acceleraţia de vârf a terenului $\ddot{u}_{g0}$, iar deplasarea spectrală D este mică. Interpretarea fizică a acestui fenomen constă în faptul că un sistem cu perioada proprie de vibraţie mică este foarte rigid, sistemul deformându-se foarte puţin, mişcarea acestuia fiind în esenţă identică cu mişcarea terenului (vezi Figura 3.9a). Astfel, acceleraţia totală de vârf a acestui sistem este apropiată de acceleraţia de vârf a terenului.

Pentru structuri cu perioada proprie de vibraţie mare (T_n>T_f), valoarea de vârf a deplasării D este apropiată de deplasarea de vârf a terenului u_{g0}, iar pseudo-acceleraţia spectrală A este mică. Interpretarea fizică a acestui fenomen constă în faptul că un sistem cu perioada proprie de vibraţie mare este foarte flexibil, terenul deplasându-se sub masa care rămâne fixă (vezi Figura 3.9b). Astfel, deformaţia de vârf a acestui sistem este apropiată de deplasarea de vârf a terenului.

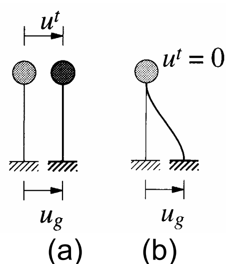


Figura 3.9. Deformaţia unui sistem foarte rigid (a) şi a unui sistem foarte flexibil (b).

Pentru structuri cu perioada proprie de vibrație mică, cuprinse între T_a şi T_c, pseudo-accelerația spectrală *A* depăşeşte accelerația de vârf a terenului $\ddot{u}_{g0}$ cu valori care depind de T_n şi ζ. Pe porțiunea dintre T_b şi T_c pseudo-accelerația spectrală *A* poate fi considerată contantă.

Pentru structuri cu perioada proprie de vibrație mare, cuprinse între T_d şi T_f, deplasarea spectrală *D* depăşeşte deplasarea de vârf a terenului u_{g0} cu valori care depind de T_n şi ζ. Pe porțiunea dintre T_d şi T_e deplasarea spectrală *D* poate fi considerată contantă.

Pentru structuri cu perioada proprie de vibrație intermediară, cuprinse între T_b şi T_c, pseudo-viteza spectrală *V* depăşeşte viteza de vârf a terenului $\dot{u}_{g0}$ cu valori care depind de T_n şi ζ şi poate fi considerată contantă.

Pe baza observațiilor anterioare, spectrul de răspuns poate fi împărțit în trei domenii. Domeniul de perioade lungi ($T_n > T_d$) se numeşte **domeniul de deplasări spectrale constante**, răspunsul structurii în acest domeniu de perioade fiind în strânsă legătură cu deplasarea terenului. Domeniul de perioade scurte ($T_n < T_c$) se numeşte **domeniul de accelerație spectrală constantă**, răspunsul structurii în acest domeniu corelat cu accelerația terenului. Domeniul de perioade intermediare, ($T_c < T_n < T_d$) se numeşte **domeniul de viteză spectrală constantă**, răspunsul structurii în acest domeniu fiind cel mai bine corelat cu viteza terenului. Aceste observații sunt evidente în cazul reprezentării tripartite a spectrelor de răspuns, dar ar fi fost mai greu de evidențiat din reprezentarea individuală a celor trei spectre de răspuns (*D*, *V*, *A*).

Există mai multe metode de determinare a perioadelor T_a, T_b, T_c, T_d, T_e, T_f. De notat faptul că valorile acestor perioade care stabilesc domeniile de deplasare constantă, viteză constantă şi accelerație constantă nu sunt unice, şi pot varia considerabil de la o înregistrare seismică la alta. Acelaşi lucru este valabil şi pentru factorii de amplificare a mişcării seismice $D/u_{g0}, V/\dot{u}_{g0}, A/\ddot{u}_{g0}$.

Amortizarea are ca efect reducerea deplasării, pseudo-vitezei şi pseudo-accelerației spectrale (vezi Figura 3.7). Pentru o amortizare egală cu zero spectrul de răspuns este marcat de variații bruşte pentru variații mici ale perioadei proprii de vibrație a structurii. Odată cu creşterea amortizării, răspunsul structurii este mult mai puțin sensibil la variația perioadei proprii de vibrație a structurii. Efectul amortizării este minim pentru $T_n \to 0$ şi $T_n \to \infty$, dar este important pentru $T_b < T_n < T_d$, efectul maxim fiind observat în domeniul de viteză spectrală constantă.

3.5. Spectre elastice de proiectare

Spectrele de răspuns determinate pentru mişcări seismice care au avut loc în trecut nu sunt în general folosite pentru proiectarea construcțiilor. Acest fapt are la bază câteva aspecte. În primul rând, spectrul de răspuns al unei înregistrări individuale este extrem de accidentat, o variație mică a perioadei proprii de vibrație a structurii rezultând în valori foarte diferite ale pseudo-accelerației, şi, în consecință, a forțelor seismice de calcul. În cel de-al doilea rând, Spectrele de răspuns înregistrate într-un amplasament dat variază considerabil de la un cutremur de pământ la altul, după cum se poate observa din Figura 3.10. Nu în ultimul rând, există multe teritorii pentru care nu sunt disponibile înregistrări seismice. De aceea, spectrele elastice de proiectarea, pe baza cărora se determină forțele seismice care acționează asupra unei structuri, sunt alcătuite din linii drepte sau din curbe netede.

Spectrele elastice de proiectare trebuie să fie reprezentative pentru mişcările seismice înregistrate în amplasament în timpul unor evenimente seismice anterioare. În cazul în care nu există înregistrări seismice anterioare, se pot folosi înregistrări existente pentru alte amplasamente cu condiții similare. Factorii care trebuie considerați pentru a obține "condiții similare" includ magnitudinea cutremurului, distanța de la falie la amplasament, structura geologică traversată de undele seismice şi condițiile locale ale terenului din amplasament.

Spectrul elastice de proiectare se bazează pe analiza statistică a unui set de *n* înregistrări seismice reprezentative pentru un amplasament dat. Înregistrarea *i* este notată cu $\ddot{u}_g^i(t)$, căreia îi corespund valorile de vârf ale deplasării, vitezei şi accelerației terenului u_{g0}^i, $\dot{u}_{g0}^i$, $\ddot{u}_{g0}^i$. Fiecare accelerogramă este apoi normalizată la valoarea de vârf a accelerației terenului, pentru a avea

aceiaşi valoare de vârf a acceleraţiei terenului (pot fi folosite şi alte criterii de normalizare). După ce se calculează spectrele de răspuns pentru fiecare înregistrare seismică, pentru fiecare valoare a perioadei proprii de vibraţie T_n vor exista n valori ale deplasării D^i, pseudo-vitezei V^i şi pseudo-acceleraţiei spectrale A^i (i=1…n). O astfel de interpretare a datelor pentru n=10 accelerograme este prezentată în Figura 3.11. Analiza statistică oferă valoarea medie şi media plus o abatere standard pentru fiecare valoare a perioadei T_n. Spectrul obţinut din valorile medii ale ordonatelor spectrale este mult mai neted decât spectrele individuale. Aceiaşi concluzie este valabilă şi în cazul spectrului mediu plus o abatere standard. În consecinţă, idealizarea acestor spectre prin linii drepte este mult mai uşoară decât cea a unui singur individual.

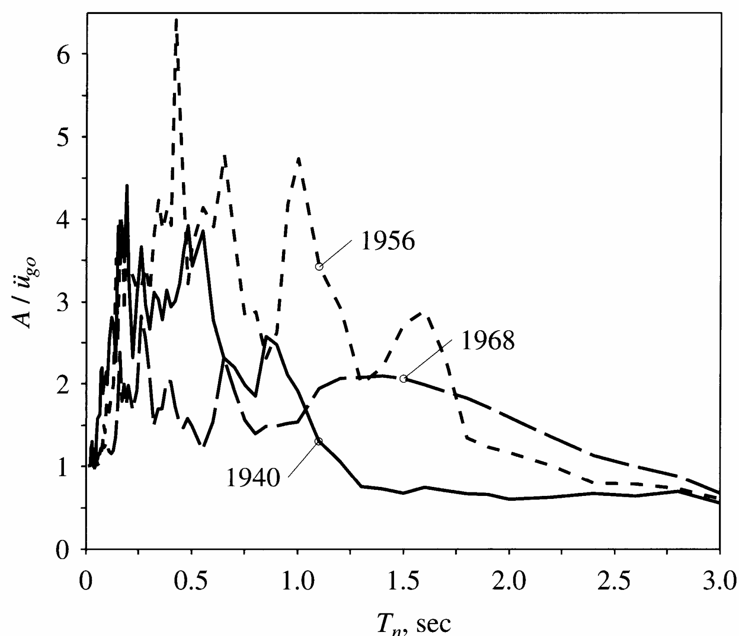


Figura 3.10. Spectre de răspuns normalizate ale pseudo-acceleraţiei pentru evenimente seismice (18 mai 1940, 9 februarie 1956 şi 8 aprilie 1968) înregistrate în acelaşi amplasament (El Centro); ζ=2%, Chopra, 2001.

Există proceduri prin care se pot determina valorile perioadelor caracteristice T_a, T_b, T_e şi T_f, precum şi a factorilor de amplificare dinamică pentru pseudo-acceleraţie $\alpha_A = A/\ddot{u}_{g0}$, pseudo-viteză $\alpha_V = V/\dot{u}_{g0}$ şi deplasare $\alpha_D = D/u_{g0}$. Pentru setul de accelerograme înregistrate în California pe amplasamente cu teren rigid, Newmark şi Hall au propus următoarele valori constante ale perioadelor caracteristice: T_a=1/33 sec, T_b=1/8 sec, T_e=10 sec, şi T_f=33 sec. Perioadele T_c şi T_d se pot determina din intersecţia dreptelor de deplasare, pseudo-viteză şi pseudo-acceleraţie constantă. Valorile factorilor de amplificare dinamică pentru spectrul mediu al aceluiaşi grup de înregistrări au fost: $\alpha_A = 2.12$, $\alpha_V = 1.65$, $\alpha_D = 1.39$ (vezi Tabelul 3.1).

Tabelul 3.1. Factori de amplificare dinamică pentru spectre elastice de proiectare (Chopra, 2001, pe baza Newmark şi Hall, 1982).

amortizarea,	valori medii			valori medii plus o abatere standard		
ζ(%)	α_A	α_V	α_D	α_A	α_V	α_D
1	3.21	2.31	1.82	4.38	3.38	2.73
2	2.74	2.03	1.63	3.66	2.92	2.42
5	2.12	1.65	1.39	2.71	2.30	2.01
10	1.64	1.37	1.20	1.99	1.84	1.69
20	1.17	1.08	1.01	1.26	1.37	1.38

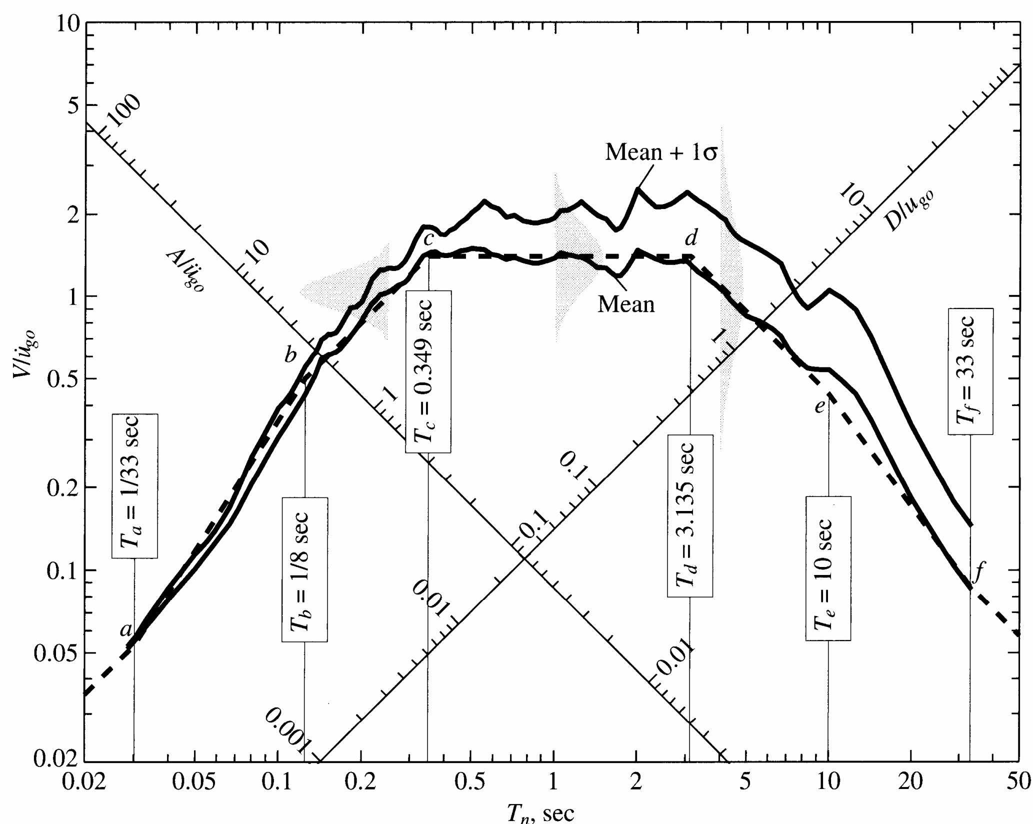


Figura 3.11. Media şi media plus o abatere standard a spectrelor de răspuns, cu distribuțiile probabilistice pentru V la valori ale T_n=0.25, 1.0, 4 sec.; ζ=5% (Chopra, 2001, pe baza Newmark şi Hall, 1982).

Procedura de construire a unui spectru de proiectare tripartit este exemplificată în Figura 3.12 şi constă din următorii paşi:

- se reprezintă grafic cele trei linii punctate corespunzător valorilor de vârf ale accelerației terenului $\ddot{u}_{g0}$, vitezei terenului $\dot{u}_{g0}$ şi deplasării terenului u_{g0}.
- se obțin valorile factorilor de amplificare dinamică α_A, α_V, α_D din Tabelul 3.1 pentru amortizarea dată ζ
- se multiplică accelerația de vârf a terenului $\ddot{u}_{g0}$ cu factorul de amplificare α_A pentru a obține linia b-c reprezentând domeniul de pseudo-accelerație spectrală constantă
- se multiplică viteza de vârf a terenului $\dot{u}_{g0}$ cu factorul de amplificare α_V pentru a obține linia c-d reprezentând domeniul de pseudo-viteză spectrală constantă
- se multiplică deplasarea de vârf a terenului u_{g0} cu factorul de amplificare α_D pentru a obține linia d-e reprezentând domeniul de deplasare spectrală constantă
- se trasează liniile $A = \ddot{u}_{g0}$ pentru perioade mai mici de T_a şi $D = u_{g0}$ pentru perioade mai mari de T_f
- se completează graficul cu liniile de tranziție a-b şi e-f

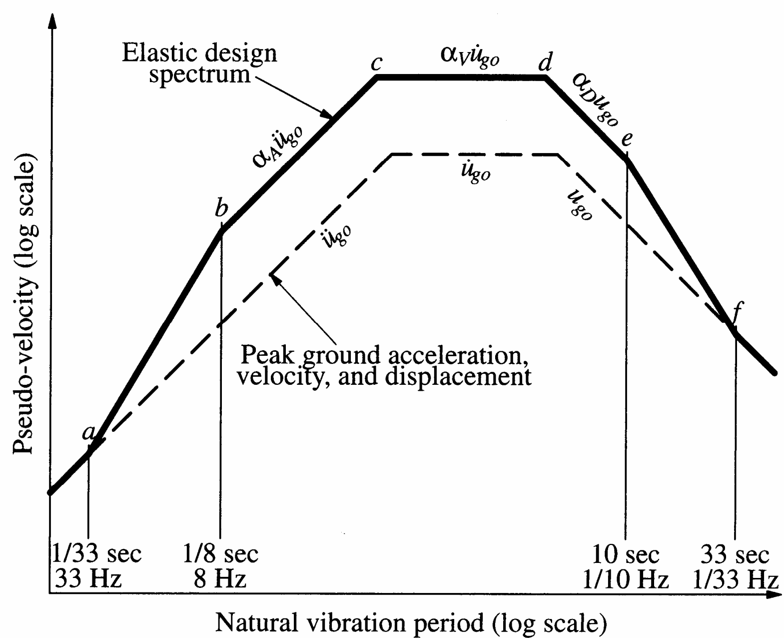


Figura 3.12. Construirea spectrului elastic de proiectare (Chopra, 2001).